

ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ С НИЗКИМИ ЧИСЛАМИ ПРАНДТЛЯ

О. Л. Крутякова, В. В. Курулин, О. В. Денисова, Н. В. Мелешкин, М. А. Сизова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородская обл.

Введение

Процесс валидации выявляет границы применимости физико-математических моделей и численных схем, которые позволяют моделировать физическое явление, протекающее в естественных условиях, до проведения численного эксперимента. Достоверность физико-математической модели, предназначенной для описания того или иного процесса, можно определить, оценив уровень вносимой ею погрешности и неопределенности по сравнению с натурным экспериментом или расчетами по прямому численному моделированию. Процедура валидации, состоящая из стадии оценки сходимости итераций, стадии проверки решения на непротиворечивость, стадии сравнения с экспериментом, а также содержащая уровни классов задач представлена в [1, 2].

С точки зрения численного моделирования течений с низкими числами Прандтля основной особенностью является описание турбулентности и учет переноса тепла, вносимого как за счет конвективного перемешивания потока, так и за счет молекулярной теплопроводности самого теплоносителя. Интенсивное изменение температуры жидкости за счет большой теплопроводности может быть на том же уровне что и изменение температуры вследствие турбулентного перемешивания [3, 4]. Этот факт определяет достаточно существенную долю тепла, переносимого за счёт молекулярной теплопроводности, и обеспечивает лучшие теплоотводящие свойства жидких металлов. Вследствие чего встает вопрос правильного разрешения турбулентных характеристик [5–7].

Целью данной работы является формирование валидационного базиса задач течения жидкометаллических теплоносителей (ЖМТ). Для относительной полноты валидационный базис должен включать задачи течения в каналах различной формы, имеющие надежные экспериментальные, либо численные данные. В [8] представлены численные данные, полученные путем прямого численного моделирования, о распределении безразмерной температуры по высоте канала. На данной задаче показано влияние применения корреляций для турбулентного числа Прандтля. Задачи о неравномерном охлаждении и нагревании труб с различного вида ЖМТ, имеющие экспериментальные данные или вычисленные аналитически, носят высокий прикладной характер [9, 10] и в достаточной степени анализируют турбулентный

теплообмен в жидкометаллической среде. Представлены результаты численного моделирования эксперимента TEFLU [11], где рассматривается смешение разнотемпературных потоков натрия при различных режимах течения. На задаче перемешивания трех струй натриевого теплоносителя определяются нестационарные характеристики потока, результаты сравниваются с экспериментальными данными [12, 13]. Характерной особенностью атомноэнергетических установок является теплообмен в пучках труб, в расчете эксперимента TEGENA рассматривается распределение температуры вблизи обогреваемых труб, обтекаемых потоком натриевого теплоносителя [14]. Учет закрученности потока был рассмотрен в задаче о гидродинамике и теплообмене в потоке ртутного теплоносителя в кольцевом канале, имеющей экспериментальные данные [15].

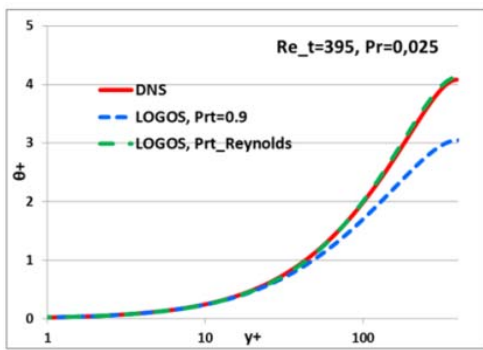
Для решения задач используется пакет программ ЛОГОС [16]. Пакет программ ЛОГОС – отечественный пакет программ инженерного анализа, предназначенный для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики, гидродинамики и прочности на высокопараллельных ЭВМ.

Описание задач базиса валидации

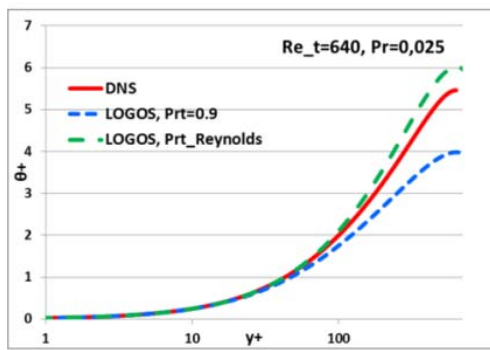
В данном разделе приводится детальное описание задач базиса валидации и результаты валидации пакета программ ЛОГОС для данного класса задач. Полученное численное решение сравнивается с результатами экспериментальных и теоретических исследований.

Развитое турбулентное течение с теплообменом в канале, ограниченном обогреваемыми параллельными плоскими пластинами

Задача о развитом турбулентном течении вязкой несжимаемой жидкости в канале, образованном двумя бесконечными параллельными плоскими пластинами, дает фундаментальное представление о природе жидкости со свойствами ЖМТ, имеет подробные данные DNS (Direct Numerical Simulation) моделирования [8]. Пластины обогреваются равномерным тепловым потоком и находятся на расстоянии h друг от друга. Число Рейнольдса, рассчитанное по средней динамической скорости $U\tau$ и полувысоте канала, для двух режимов составляет $Re_\tau = 395$ и $Re_\tau = 640$, что



а



б

Рис. 1. Распределение безразмерной температуры: а – $Re_\tau = 395$, б – $Re_\tau = 640$

соответствует условиям DNS расчетов. В табл. 1 представлены значения источников импульса и энергии, заданные в соответствии с режимом течения.

Таблица 1

Источники импульса и энергии

Режим №	Значение Re_τ	Источник импульса, Па/м	Источник энергии, Вт/м ³
1	395	3,95	40,5
2	640	10,24	25

Существует несколько способов вычисления турбулентного числа Прандтля при расчете течений ЖМТ, включая специализированные модели турбулентности [5]. В расчетах использована корреляция Рейнольдса для вычисления турбулентного числа Прандтля [1]:

$$Pr_t = \frac{1 + 100 \cdot Pe^{-0,5}}{1 + 120 \cdot Re^{-0,5}} \quad (1)$$

На рис. 1 представлены профили безразмерной температуры, полученные из расчетов по пакету программ ЛОГОС для режима № 1 и № 2 с турбулентным числом Прандтля, рассчитанным по корреляции Рейнольдса (1), которое составило $Pr_t = 3,145$, в сравнении со значением, традиционно используемым в вычислительных кодах $Pr_t = 0,9$. Полученные результаты сравниваются с данными DNS.

Из анализа представленных профилей видно, что результаты, полученные из расчета с $Pr_t = 0,9$, неудовлетворительно описывают распределение температуры жидкости с гидродинамическим числом Прандтля $Pr = 0,025$. Безразмерная температура по высоте канала существенно занижена, относительная погрешность по ее максимуму составила более 26 % для режима № 1 и 27 % для режима № 2. При использовании корреляций Рейнольдса для режима течения № 1, достигнуто хорошее согласие, погрешность составила около 1 %, в сравнении с результа-

тами DNS. Для режима № 2 профиль безразмерной температуры лежит чуть выше, несмотря на это, удалось снизить относительную погрешность, она составила 7 %.

Течение ртути в трубе с неравномерным подогревом

Задача о течении ртути в трубе с неравномерным подогревом является базовой для верификации CFD-кодов применительно к проблеме турбулентного теплообмена в жидкометаллической среде [9].

Расчетной областью является отрезок трубы длиной $1,75\text{ м}$ ($92,1d$, где d – диаметр канала, который составил 19 мм), при этом $50d$ – участок предварительной гидродинамической стабилизации, на котором обогрев отсутствует. Остальное расстояние $42,1d$ – обогреваемый постоянным тепловым потоком участок, на котором происходит термическая стабилизация уже при развитом турбулентном течении.

Граничные условия на входе, а также величина плотности теплового потока заданы в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Параметры потока

Сечение, x/d	2,0	9,0	15,0	35,0
Число Рейнольдса	51440	49010	49180	49580
Скорость набегающего потока, м/с	0,29781	0,27811	0,2782	0,2772
Температура набегающего потока, К	306,46	306,05	305,52	306,22
Расход, Вт/м ²	28700	28800	29500	28100

Расчетная область представляет собой простую трубу постоянного сечения, поэтому для моделирования турбулентности была выбрана модель линейной вихревой вязкости SST. Турбулентное число Прандтля вычислялось с помощью корреляции Рейнольдса (1) и составило $Pr_t = 2,066$ для всех расчётных случаев.

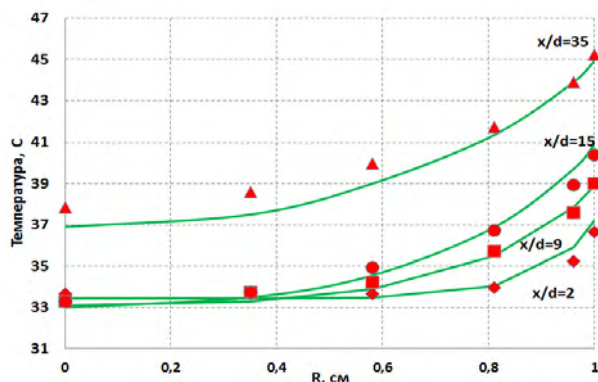


Рис. 2. Распределение температур по радиусу в различных сечениях (сплошными линиями обозначен расчет, маркером – экспериментальные данные)

На рис. 2 приведено сопоставление данных расчёта с экспериментом для четырех контрольных сечений с относительными координатами $x/d = 2$ ($x = 0,988$ м), $x/d = 9$ ($x = 1,121$ м), $x/d = 15$ ($x = 1,235$ м), $x/d = 35$ ($x = 1,615$ м). Наибольшая разница расчетной и экспериментальной температуры видна для первых двух точек сечения $x/d = 35$, расчетные значения несколько занижены относительно экспериментальных. Максимальная относительная погрешность составила 3%. В целом, результаты численного моделирования течения ртути в трубе с заданным потоком тепла на части поверхности в высокой степени согласуются с экспериментальными данными.

Турбулентное течение натриевого теплоносителя в трубе с охлаждением

Рассматривается развитое турбулентное течение натриевого теплоносителя в круглой трубе, постановка задачи и аналитическое решение описаны в [10]. Снаружи труба омывается средой с бесконечно большим расходом и бесконечно большим коэффициентом теплоотдачи. В этом случае температуру наружной стенки трубы можно принять постоянной. Расчетной областью является отрезок трубы длиной 2,5 м ($50d$, где d – диаметр канала, который составил 0,05 м), при этом $40d$ – участок предварительной гидродинамической стабилизации, на котором обогрев отсутствует. Остальное расстояние, $10d$ – охлаждаемый участок, на котором происходит термическая стабилизация уже при развитом турбулентном течении.

Граничные условия: на входе задана среднemasовая скорость и температура (см. табл. 3). На первом участке внешней поверхности трубы задается адиабатическое условие, это сделано для получения на входе во вторую часть стабилизированного распределения скорости потока. На охлаждаемой части трубы задается граничное условие первого рода $T = 423$.

Режима расчета

№	Расход теплоносителя, кг/с	Скорость на входе, м/с	Турбулентное число Прандтля
1	0,63	0,3913	4,7
2	1,26	0,7826	3,9
3	2,1	1,3043	3,4
4	3,151	1,9571	3
5	5,253	3,2626	2,6
6	7,353	4,5669	2,4
7	10,505	6,5246	2,2

При моделировании турбулентности использовалась модель SST, турбулентное число Прандтля рассчитано с помощью корреляции Рейнольдса (1), приведено в табл. 3 в соответствии с режимом течения.

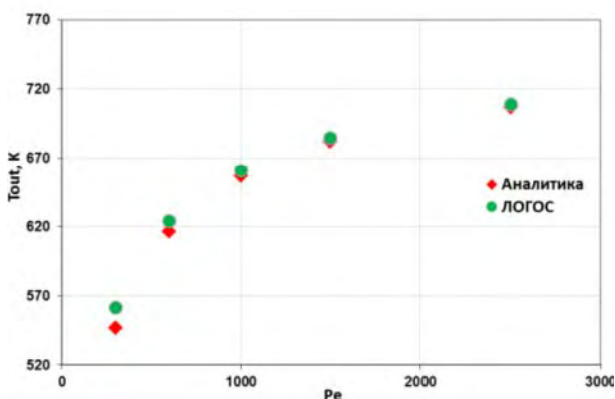


Рис. 3. Зависимость осредненной температуры на выходе от числа Пекле

Сравниваются расчетные значения температуры, осредненные по расходу на выходе из трубы с аналитическими данными. Из рис. 3 видно, что результаты согласуются с аналитическим решением. Для режима № 1 относительная погрешность составила 2,7%, отметим, что ее значение уменьшается с увеличением числа Рейнольдса.

Перемешивание разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя на стенде TEFLU

Стенд TEFLU [11] предназначен для моделирования процессов перемешивания разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя. Экспериментальная установка состоит из вертикальной трубы с внутренним диаметром 110 мм и подвижной в продольном направлении решетки.

Геометрическая модель представляет собой сектор трубы с углом 5 градусов, Длина расчетной модели 400 мм, радиус 55 мм. Построена сетка с количеством ячеек $3200 (N_r \times N_x = 80 \times 400)$ – количество ячеек в радиальном и осевом направлениях, соответственно), с измельчением к центру и к входу трубы.

Параметры потока

Параметры потока (экспериментальный режим)	Вынужденная конвекция (forced)	Переходной режим (buoyant)	Свободная конвекция (plume)
Средняя скорость основного потока, м/с	0,05	0,1	0,1
Средняя температура основного потока, К	573	573	573
Разность скоростей между горячей и холодной струями, м/с	0,5	0,33	0,17
Разность температур между горячей и холодной струями, К	30	25	75
Общий расход основного потока, кг/с	0,436	0,848	0,842
Турбулентное число Прандтля	6,5	6,9	7,6

На рис. 4, 5 представлены распределение скорости и температуры по оси симметрии для трех режимов течения.

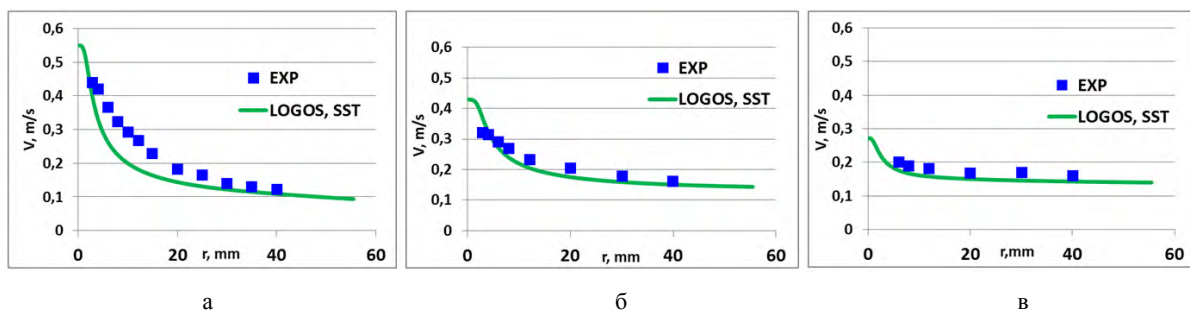


Рис. 4. Распределение скорости на оси трубы: а – вынужденная конвекция, б – переходной режим, в – свободная конвекция

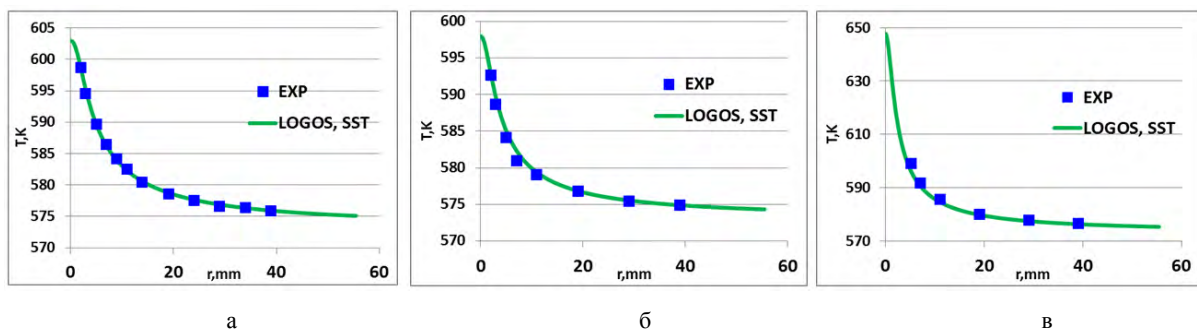


Рис. 5. Распределение температуры на оси трубы: а – вынужденная конвекция, б – переходной режим, в – свободная конвекция

Теплофизические свойства натрия заданы зависящими от температуры [11].

Задача решается в режимах: вынужденная конвекция, переходный режим, свободная конвекция. Граничные условия: на входе задана среднemasовая скорость, и температура струи и основного потока (см. табл. 4).

Расчетные профили температуры совпадают с экспериментальными значениями с высокой точностью. В распределении скорости есть отличия в случае вынужденной конвекции, где разница между температурой горячей и холодной струи максимальна. Расчетные профили лежат ниже экспериментальных, погрешность составила 19 %. Для переход-

ного режима и режима свободной конвекции отличия менее значительны, максимум относительной погрешности для распределении температуры составил 2 %.

Перемешивание трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя

Задача моделирует проведение эксперимента смешения трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя [12, 13]. В ходе экспериментального исследования установлен турбулентный характер течения, определена амплитуда и частота темпера-

турных колебаний, средние значения нормированной температуры в контрольных точках.

Через три прямоугольных параллельных отверстия толщиной 20 мм и длиной 180 мм проходят разнотемпературные потоки натрия, Входные отверстия и область смешения потоков заключены между пластинами из нержавеющей стали толщиной 12 мм. Геометрическая модель расчетной области соответствовала упрощенной конфигурации выхода из активной зоны реактора [13]. Расчетная сетка содержала 9,3 млн. ячеек.

Граничные условия: на входах задана средне-массовая скорость и температура, в центре моделировалась холодная струя (V_x, T_x), по бокам – горячие (V_g, T_g), параметры режима представлены в табл. 5. На боковой границе установлено условие симметрии, на выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю.

Таблица 5

Скорость и температура потока

Параметры горячего натрия		Параметры холодного натрия	
Скорость, м/с	Температура, °C	Скорость, м/с	Температура, °C
0,51	347,7	0,51	304,5

Поскольку геометрия расчетной области предполагает наличие двугранных углов в районе истечения струй, для моделирования турбулентности была выбрана алгебраическая модель напряжений Рейнольдса EARSM. Турбулентное число Прандтля вычислялось с помощью корреляции Рейнольдса (1) и составило $Pr_t = 5,4$.

Исследуются временные зависимости температуры, а также проводится сравнение средней температуры в контрольных точках (КТ). КТ1 располагается в центре расчетной области (-15 мм, 90 мм, $z = 100$ мм), КТ2 находится вблизи стальной пластины ($x = -15$ мм, $y = 0,5$ мм, $z = 100$ мм), ось z совпадает с плоскостью выхода струй из направляющих

каналов. Сравнение проводится по величине безразмерной температуры, которая определяется по формуле [18]:

$$T^* = \frac{T - T_x}{\Delta T},$$

где $\Delta T = T_g - T_x$.

На рис. 6 представлены временные зависимости безразмерной температуры в контрольных точках, в сравнении с экспериментальными колебаниями температур. Как видно из рисунка, максимум амплитуды колебаний совпадает с экспериментальными значениями как для КТ1, так и для КТ2.

В табл. 6 приведены средние значения нормированной температуры за момент времени, равный $t = 0-60$ сек.

Таблица 6

Среднее значение температуры в сенсорах

	Среднее значение безразмерной температуры		Относительная погрешность	
	$Y = 90$ мм	$Y = 0,5$ мм	$Y = 90$ мм	$Y = 0,5$ мм
Эксперимент	0,33	0,417	-	-
Расчет	0,34	0,422	3,4 %	1 %

Максимальная относительная погрешность составила 3,4 % для находящейся в центре контрольной точки, для КТ2 составила около 1 %.

Гидродинамика и теплообмен в потоке натриевого теплоносителя в пучке обогреваемых стержней, эксперимент TEGENA

В эксперименте TEGENA [14] исследуется температурное распределение при течении натрия вдоль четырех электрообогреваемых стержней, тем самым моделируется обтекание теплоносителем пучка стержней в атомных реакторах.

Расчетная модель представляет собой область с исключенными отверстиями для стержней, на

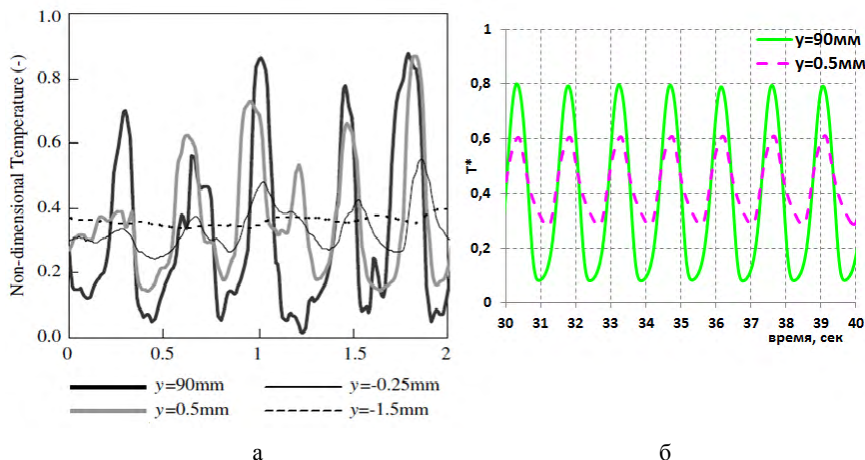


Рис. 6. Колебания температуры в контрольных точках: а – эксперимент, б – расчет LOGOS

стенках которых будут заданы соответствующие тепловые характеристики течения, которая включает в себя все 4 стержня без учета дистанционирующих решеток. Расчетная сетка имеет блочную структуру и состоит из 9,8 млн. гексагональных элементов.

На входе заданы постоянная скорость и температура, значения теплового потока на каждом из стержней имеют разную величину (см. табл. 7). Данные параметры соответствуют значению числа Пекле $Pe = 352,52$. На выходной границе задается свободный выход, все стенки приняты адиабатическими. Теплофизические свойства натрия определялись функциональными зависимостями от температуры, согласно [14].

На рис. 7 представлено распределение температуры по высоте канала между третьим и четвертым стержнями в установке TEGENA.

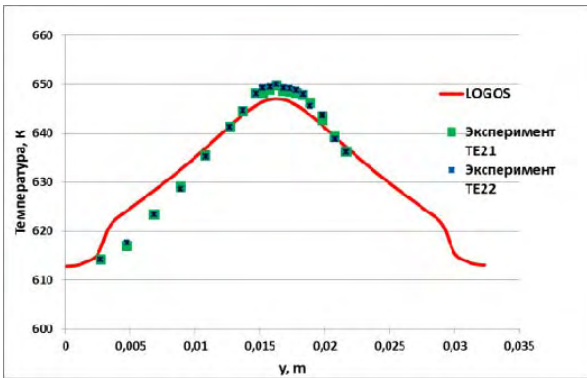


Рис. 7. Распределение температуры между третьим и четвертым стержнем

Отличие наблюдается вблизи одной из стенок, где происходит завышение температуры, с противоположной стороны экспериментальные данные от-

сутствуют. Температура по центру канала оказалась несколько занижена, относительная погрешность по ее максимуму не более 2 %, данное значение входит в допустимый диапазон экспериментальных погрешностей.

Гидродинамика и теплообмен в потоке ртутного теплоносителя в закрученном кольцевом канале

Экспериментальный стенд [15] представляет собой герметизированный контур циркуляции теплоносителя. Рабочим участком является кольцевой канал, расположенный вертикально, образованный двумя трубами длиной 1000 мм. К наружной поверхности внутренней трубы приварено ребро. Во внутренней трубе располагается электрический нагреватель, изготовленный из нихромовой проволоки диаметром 1,0 мм. Теплоноситель поступает через входной патрубок в нижней камере, затем проходит через рабочий участок и выходит через выходной патрубок в верхней камере.

В качестве расчетной модели кольцевого канала рассматривается канал длиной 1000 мм, включающий в себя внутреннюю и наружную трубы, а также витое ребро, состоящие из стали. Расчетная сетка имеет блочную структуру и состоит из гексагональных элементов, суммарное количество контрольных объемов расчетной сетки составило 3,9 млн. ячеек.

Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость $V = 0,12$ м/с, температура $T = 290,15$ К; на выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю, На твердой стенке (внутренний цилиндр) задан поверхностный тепловой поток $q_w = 50465,38$ Вт/м² (погрешность экспериментального определения энерговыделения составляет 5 %); на всех твердых, необогреваемых по-

Таблица 7

Параметры течения

Число Рейнольдса	Массовый поток, кг/с	Температура на входе, °С	Поток тепла на стержне 1, Вт/см ²	Поток тепла на стержне 2, Вт/см ²	Поток тепла на стержне 3, Вт/см ²	Поток тепла на стержне 4, Вт/см ²
60100	3,12	257,98	49,38	49	48,42	49,74

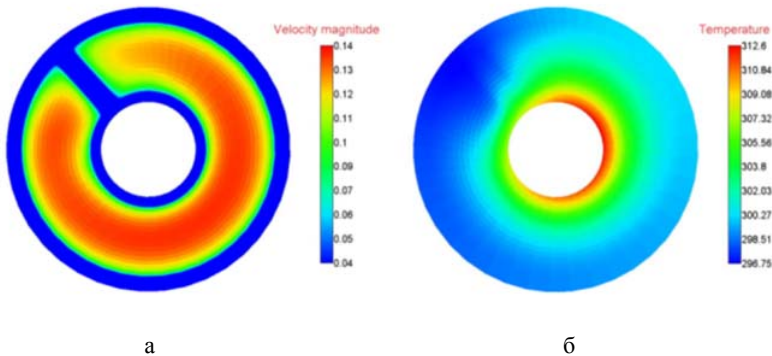


Рис. 8. Поля распределения: а – амплитуды скорости, б – температуры в сечении $z = 900$ мм

верхностях задано адиабатическое граничное условие.

Ввиду наличия закрутки потока имеет место несимметричность распределения скорости относительно ребра, поэтому моделирование турбулентности производилось с помощью модели EARSM. Турбулентное число Прандтля, вычисленное с помощью корреляций Рейнольдса (1), составило $Pr_t = 2,5$.

На рис. 8 представлены поля скорости и температуры в сечении $z = 900$ мм, недалеко от выхода из расчетной области. Наличие витого ребра, по аналогии с распределением скорости, приводит к деформации поля температуры потока теплоносителя в поперечном сечении модели. Температурный максимум на внутренней, обогреваемой трубе смещается в сторону направления тангенциальной компоненты скорости. Большие значения скорости наблюдаются по направлению навивки ребра. На рис.9 показаны экспериментальное и расчетное распределения безразмерной температуры по радиусу кольцевого канала, которая определяется:

$$\theta = \frac{\lambda(T_w - T_{\text{ТН}})}{q_w d_z}$$

Здесь T_w и $T_{\text{ТН}}$ – температура стенки и теплоносителя, соответственно, λ – коэффициент теплопроводности, d_z – гидравлический диаметр канала, q_w – поверхностный тепловой поток.

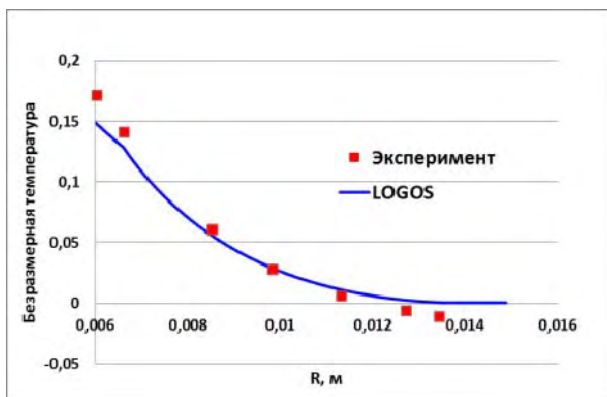


Рис. 9. Распределение безразмерной температуры по радиусу канала в сечении $z = 900$ мм, $\varphi = 291^\circ$

Наибольшее отклонение наблюдается при изменении температуры в окрестности внутренней трубы и составляет порядка 13 %, допустимая погрешность измерений при проведении эксперимента 5 %.

Заключение

В докладе собран минимальный базис задач валидации методов моделирования течений жидкометаллических теплоносителей, характеризующихся низкими числами Прандтля. В базис задач вошли наиболее известные тесты, имеющие надежные экспериментальные, либо численные данные. Рассмотрены задачи о внутренних течениях в трубах и кана-

лах различной формы, смешении разнотемпературных потоков, а также течения в пучке стрежней. Для каждой задачи приведено описание постановки и имеющиеся для нее опорные данные.

Также в докладе представлены результаты численного моделирования рассматриваемых задач по пакету программ ЛОГОС в рамках RANS моделей турбулентности. Затронут вопрос об уточнении решения путем использования корреляций для определения турбулентного числа Прандтля.

Литература

1. AIAA, Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations // AIAA. 1998.G-077.
2. Deryugin Yu., Zhuchkov R., Zelenskiy D., Kozelkov A., Sarazov A., Kudimov N., Lipnickiy Yu., Panasenko A. Validation results for the LOGOS multifunction software package in solving problems of aerodynamics and gas dynamics for the lift-off and injection of launch vehicles // Mathematical Models and Computer Simulations. 2015. Vol. 7, N 2. P. 144–153.
3. Menghini F. Advanced Computational Fluid Dynamics models for liquid metal flows // Esame finale anno accademico. 2014-2015. P. 218.
4. Grotzbach G. Challenges in simulation and modeling of heat transfer in low-Prandtl number fluids // The 14 th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-14. Toronto, Canada. 2011. P. 33.
5. Козелков А. С., Куркин А. А., Курулин В. В., Легчанов М. А. Тятюшкина Е. С., Циберева Ю. А. Исследование применения RANS моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля // Механика жидкости и газа. 2015. Т. 4. С. 44–58.
6. Козелков А. С., Куркин А. А., Крутякова О. Л., Курулин В. В., Тятюшкина Е. С. Зонный RANS–LES подход на основе алгебраической модели Рейнольдсовых напряжений // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 5. С. 24–33.
7. Bricteux L., Duponcheel M., Manconi M., Bartosiewicz Y. Numerical prediction of turbulent heat transfer at low Prandtl number // Proc. 6th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm), France, 2012.
8. Abe H., Kawamura H. A study of turbulence thermal structure in a channel flow through DNS up to $Re_{\tau} = 640$ with $Pr = 0,025$ and $0,71$ // Proc. of 9th European Turbulence Conference. 2002. P. 399-402.
9. Ковалев С. И. Влияние продольного магнитного поля и термогравитационной конвекции на теплоотдачу при тчении жидкого металла // Диссертация кандидата технических наук. МЭИ. 1988.
10. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
11. Carteciano L., Grotzbach G. Validation of turbulence models in the computer code FLUTAN for

a free hot sodium jet in different buoyancy flow regimes // FZKA 6600. 2003.

12. Kimura N., Miyakoshi H., Kamide H. Experimental investigation on transfer characteristics of temperature fluctuation from liquid sodium to wall in parallel triple-jet // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50. P. 2024–2036.

13. Рогожкин С. А., Аксёнов А. А., Жлуктов С. В., Осипов С. Л., Фадеев И. Д., Шапоренко Е. В., Шепелев С. Ф., Шмелев В. В. Использование URANS подхода для определения пульсаций температуры при перемешивании трех разнотемпературных струй натрия // Компьютерные исследования и моделирование 2014. Т. 6, № 6. С. 923–935.

14. Möller R. TEGENA: Detaillierte experimentelle untersuchungen der temperatur- und geschwindig-

keitsverteilungen in stabbündel-geometrien mit turbulenter natriumströmung // KfK 4491. Karlsruhe, Germany, 1989.

15. Генин Л. Г., Крылов С. Г., Листратов Я. И., Захаров А. Г. Исследование полей скорости и температуры в кольцевом канале с винтовым оребрением применительно к созданию тепловыделяющей сборки реактора БРЕСТ-ОД-300 / Конференция «Инновации в атомной энергетике» // Сборник докладов. М.: Изд-во АО «НИКИЭТ». 2015. С. 300–311.

16. Погосян М. А., Савельевских Е. П., Стрелец Д. Ю., Корнев А. В., Шагалиев Р. М., Козелков А. С. Использование отечественных суперкомпьютерных технологий при проектировании новых образцов авиационной техники // Авиационная промышленность. 2013. № 3. С. 3–7.